



저작자표시-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

工學碩士 學位論文

FCAW에서의 아크 길이 추정 방법 개발에 관한 연구



2009年 2月

釜慶大學校 大學院

조선시스템관리공학협동과정

裴 洸 茂

工學碩士 學位論文

FCAW에서의 아크 길이 추정 방법 개발에 관한 연구

指導教授 趙相明

이 論文을 工學碩士 學位論文으로 提出함



2009年 2月

釜慶大學校 大學院

조선시스템관리공학협동과정

裴洸茂

裴洸茂의 工學碩士 學位論文으로 認准함

2009年 2月



主 審 工學博士 金 仁 喆 (印)

委 員 工學博士 具 滋 三 (印)

委 員 工學博士 趙 相 明 (印)

목 차

Abstract	1
제 1 장 서론	2
1.1 연구배경 및 필요성	2
1.2 연구목적 및 개요	2
제 2 장 이론적 배경	3
2.1 FCAW의 정의	3
2.2 FCAW에서의 용접 전압에 따른 아크 길이 및 스패터량	6
2.3 CTWD와 와이어 돌출길이의 정의	7
2.4 용접 회로의 저항성분에 대한 정의	8
2.5 용접 케이블 저항에 의한 전력 손실	9
2.6 와이어 용융 속도의 정의	14
2.7 GTAW에서 용접 전류와 단락 에너지의 관계	15
2.8 와이어 발열량의 정의	18
2.9 온도에 따른 steel 와이어의 고유저항 특성	20
제 3 장 용접 회로 저항 측정	21
3.1 서언	21
3.2 Jo 등의 논문 검토	21
3.3 실험 재료 및 방법	23
3.2.1 실험 재료	23
3.2.2 실험 방법	24
3.3 실험 결과 및 고찰	26
3.3.1 단락시 저항(R_{sc}) 측정	26
3.3.2 결과 및 고찰	27
3.4 결론	29

제 4 장 아크 피크 전압(V_{arc}) 측정에 따른 순수 아크 전압 강하(V_{arc})	
계산	30
4.1 서언	30
4.2 실험 재료 및 방법	31
4.2.1 실험 재료	31
4.2.2 실험 방법	31
4.3 실험 결과 및 고찰	35
4.4 결언	37
제 5 장 순수 아크 전압 강하(V_{arc})와 아크길이(L_{arc})의 상관관계 검토...	38
5.1 서언	38
5.2 실험 재료 및 방법	38
5.2.1 실험 재료	38
5.2.2 실험 방법	39
5.3 실험 결과 및 고찰	42
5.4 결언	46
제 6 장 결론	47
참고문헌	48

A study on the development of arc length estimation method in FCAW

Kwang-moo, Bae

*Department of Shipbuilding systems Management Engineering,
The Graduate School, Pukyong National University*

Abstract

The flux cored arc welding (FCAW) process is one of the most frequently employed and important welding process due to high productivity and excellent workability. The process is performed either as an automated process or as a semi-automatic process. In FCAW process, welding voltage has been considered as a qualitative indication of arc length. But it is necessary to let welding operators know, maintain and manage the arc length directly by estimating and displaying it. In this study, to develop arc length estimation technique, we measured a welding circuit resistance(R_{sc}) and then we calculated welding circuit voltage drop(V_{sc}). Also, we measured arc peak voltage(V_{ap}). By subtracting V_{sc} from V_{arc} , we can easily calculate net arc voltage drop(V_{arc}). Consequently, we suggested arc length estimating equation and basic algorithm by regressive analyzing the relationship between net arc voltage drop(V_{arc}) and real arc length(L_{arc}) measured by high speed camera. So, we can estimate arc length by just monitoring welding current and voltage.

Key words : FCAW, Short circuit transfer, Arc length estimation, Welding circuit resistance(R_{sc}), Voltage drop by welding circuit(V_{sc}), Arc peak voltage(V_{ap}), Net arc voltage drop(V_{arc})

제 1 장 서론

1.1 연구배경 및 필요성

FCAW(Flux Cored Arc Welding)는 SMAW나 GMAW에 비해 우수한 작업성과 생산성으로 인해 조선을 비롯한 강구조물의 수동 및 자동 용접에서 널리 사용되고 있다. 정전압(Constant voltage) 제어 방식의 FCAW에서의 아크 길이는 용접 전압에 비례한다.¹⁾ 따라서 설정 전압은 용접 시 아크 길이를 나타내는 정성적 지표로 인식되어왔다. 대부분의 FCAW 용접기는 전압 미세 조절 볼륨을 이용하여 원하는 전압을 설정하게 되어 있으며, 용접기 사용자에게 따라 그 설정 전압 값을 각자의 작업 방식에 맞추어 지극히 정성적이고 개인 경험적 감각에 의한 방법으로 조절되고 있다.

설정 전압을 적정 전압보다 크게 하여 과도하게 긴 아크 길이로 용접을 할 경우 입열량 과대에 의해 용접 변형량이 증가할 수 있으며, 그 반대의 경우에는 짧은 아크 길이로 인해 스패터 발생량이 증가할 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 용접기 설정 전압으로 아크 길이를 간접적으로 짐작하는 것이 아니라, 인라인에서 용접 파형을 이용하여 아크 길이를 추정·표시함으로써 현장 작업자 및 오퍼레이터로 하여금 직접적으로 아크 길이를 알 수 있게 하여 적절한 아크 길이를 유지, 관리하게 하는 것이 필요하다.

1.2 연구목적 및 개요

본 연구에서는 회로 전압 강하(V_{sc})를 제외한 순수 아크 전압 강하(V_{arc})를 이용한 FCAW에서의 아크 길이 추정 방법 개발에 관한 연구를 하였다.

싸이리스터 제어 방식의 용접기를 사용한 FCAW에서의 회로 전압 강하(V_{sc})를 계산하였고, 아크 피크 전압(V_{ap})과 V_{sc} 값의 차로 얻어진 순수 아크 전압(V_{arc})과 실측 아크 길이(L_{arc})와의 관계를 회귀 식으로 나타내어 아크 길이를 추정할 수 있는 기본 알고리즘을 제안하였다.

제 2 장 이론적 배경

2.1 FCAW의 정의

플럭스코어드 아크 용접(Flux Cored Arc Welding, FCAW)은 용융지와 여기에 연속적으로 공급되는 전극와이어 사이에서 발생하는 아크열을 이용하는 용접방법이다. 이 용접법은 압력의 적용없이 외부에서 가스를 공급하거나 또는 하지 않을 수 있고 튜브형태의 전극와이어 안에 있는 플럭스로부터 실드가스가 얻어지는 공정이다. 이 공정은 GMAW의 한 변형으로 전극와이어의 형상에 근거한다.

FCAW에는 두가지 변형이 있는데 하나는 실드가스를 공급하는 것이고 다른 하나는 전극와이어 내부 플럭스의 분해로부터 발생하는 가스를 이용하여 실드하는 형태이다. FCAW는 GMAW와는 전극와이어를 제외하고는 거의 일치한다.

Fig. 2.1에 플럭스코어드 와이어와 솔리드 와이어의 횡단면을 모식적으로 비교하였다.

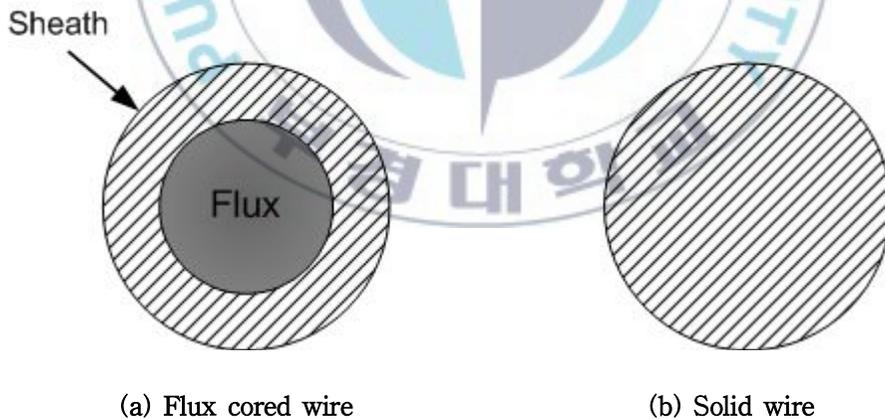


Fig. 2.1 Cross section of flux cored wire and solid wire

2.1.1 FCAW의 원리

FCAW는 모재와 연속으로 공급되는 소모성 플럭스코어드 와이어 사이에서 발생하는 아크열을 이용한다. 아크열은 모재금속의 표면과 와이어를 용융한다. 전극와이어에서 녹는 금속은 아크를 관통하여 모재로 이동하고 용융금속은 용접금속으로 용착된다. 실드는 플럭스코어드 와이어에 포함된 화학성분의 분해로부터 된다. 추가적인 실드는 아크 주위에 노즐을 통하여 공급되는 가스에 의해 된다. 전극 와이어 내부의 플럭스 성분은 분해되어 실드가스를 생성하거나 탈산제, 청정제와 합금원소도 공급한다. 이러한 분해 성분이 유리질의 슬래그를 형성하고 용착된 용접금속보다 가벼워 용접부의 표면으로 떠올라 피복을 보호한다. 전극와이어는 감겨진 코일형태여서 자동적으로 공급된다. 아크는 자동적으로 발생되고 수동이나 기계에 의해 이송된다.

Fig. 2.2는 FCAW의 모식도이다.

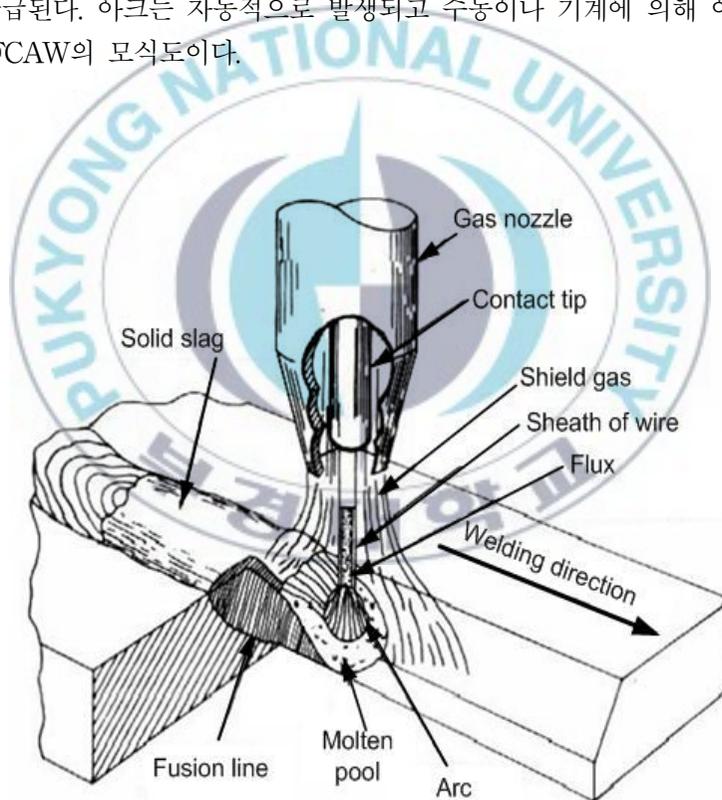
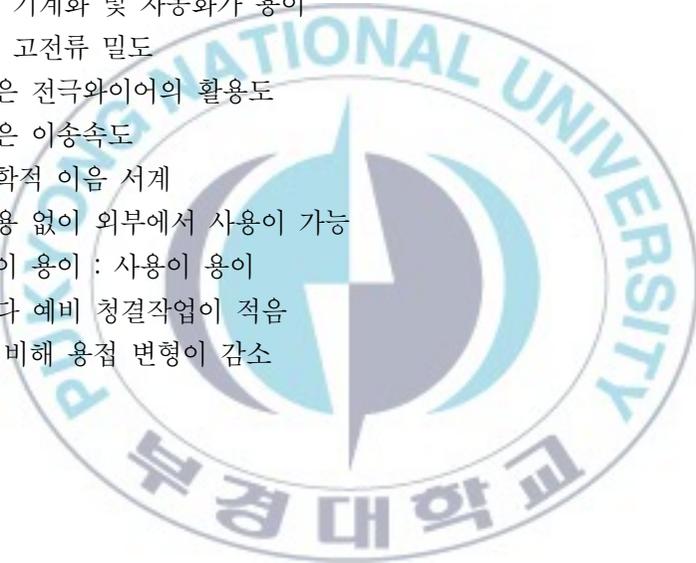


Fig. 2.2 Schematic of FCAW

2.1.2 FCAW의 장점²⁾

FCAW는 수동 SMAW와 서브머지드 및 GMAW를 능가하는 이점을 가졌다. 간단히 말해서 FCAW는 SMAW에서보다 용접사에게 적은 노력을 요구하면서도 고품질 용접을 제공한다. GMAW보다 유용하고 서브머지드 아크 용접보다 융통성이 있어 적용하기 쉽다. 이 용접법의 장점은 아래와 같다.

- 고품질 용접금속의 용착
- 우수한 용접외관 : 부드럽고 균일한 용접부
- 얇은 두께범위를 갖는 다양한 금속의 용접
- 고작업률 : 기계화 및 자동화가 용이
- 고용착률 : 고전류 밀도
- 비교적 높은 전극와이어의 활용도
- 비교적 높은 이송속도
- 절렬한 공학적 이음 서계
- 가스의 활용 없이 외부에서 사용이 가능
- 아크 식별이 용이 : 사용이 용이
- GMAW보다 예비 청결작업이 적음
- SMAW에 비해 용접 변형이 감소



2.2 FCAW에서의 용접 전압에 따른 아크 길이 및 스패터량

FCAW 및 GMAW와 같은 소모성 아크 용접에서는 주로 정전압 방식의 용접 전원을 사용한다. 정전압 방식 전원의 특성에 따라 용접 전압이 일정하게 출력되며, 용접 전압이 증가할수록 아크 길이 역시 증가하는 특성을 가진다. 용접 전압이 과도하게 낮거나 높으면 용접 스패터 발생량이 증가하여 용접 품질에 악영향을 끼칠 수가 있다. Fig.2.3은 Kim등에 의해 연구된 용접 전압에 따른 스패터 발생율을 나타낸다.3) 용접 전압이 적정 전압에 비해 높거나 낮은 경우 스패터 발생율이 증가하며, 각 와이어 직경별로 스패터 발생율이 최소가 되는 최적의 용접 전압 범위가 존재한다.

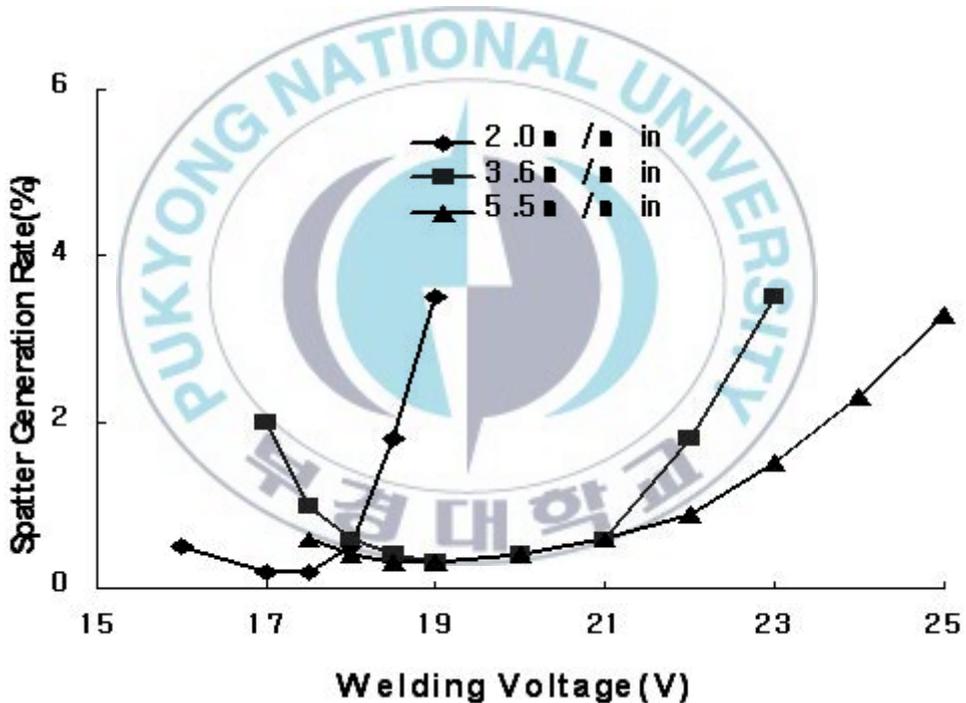


Fig. 2.3 Spatter Generation rate with welding voltage³⁾

2.3 CTWD와 와이어 돌출길이의 정의

Fig. 2.4에서와 같이 CTWD (Contact tip To Workpiece Distance)는 콘택트 팁 (contact tip) 선단에서 모재 표면까지의 거리이며, 와이어 돌출길이(stick out)는 콘택트 팁 선단에서 와이어가 돌출해 있는 길이로 정의된다. FCAW나 GMAW에서 CTWD는 와이어 돌출길리와 아크길이(arc length)의 합으로 표현될 수 있다.

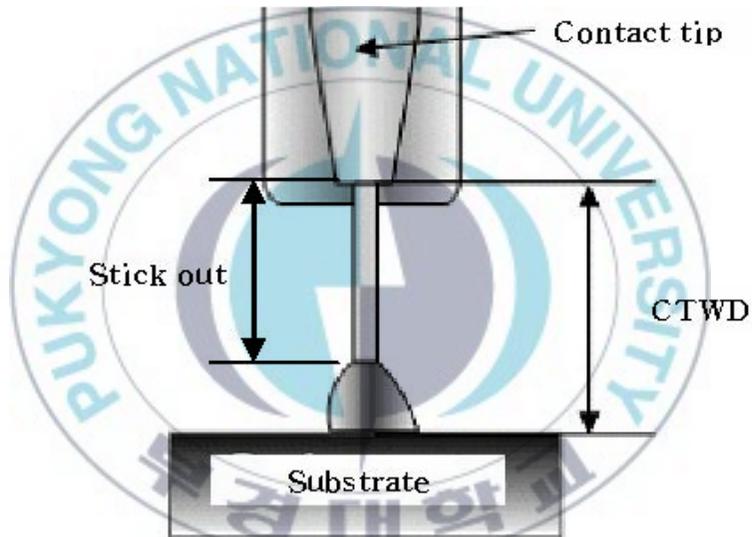


Fig. 2.4 Schematic drawing of CTWD and stick out in GMAW

2.4 용접 회로의 저항성분에 대한 정의

FCAW나 GMAW 용접은 아크가 발생되거나 와이어와 모재가 단락이 되면서 하나의 폐회로를 구성한다. 용접 회로를 구성하는 각각의 저항 요소들을 Fig. 2.5에 나타내었다. 본 연구에서 정의한 저항 성분은 토치 케이블과 접지 케이블로 인한 용접 케이블 저항(R_{wc}), 용접 와이어와 컨택팁 간의 접촉으로 인한 와이어 접촉 저항(R_{con}), 컨택팁 외부로 돌출 된 와이어로 인한 돌출 와이어 벌크 저항(R_{wire}), 그리고 용접 회로 저항의 가장 큰 비중을 차지하는 아크 저항(R_{arc})로 구성된다.

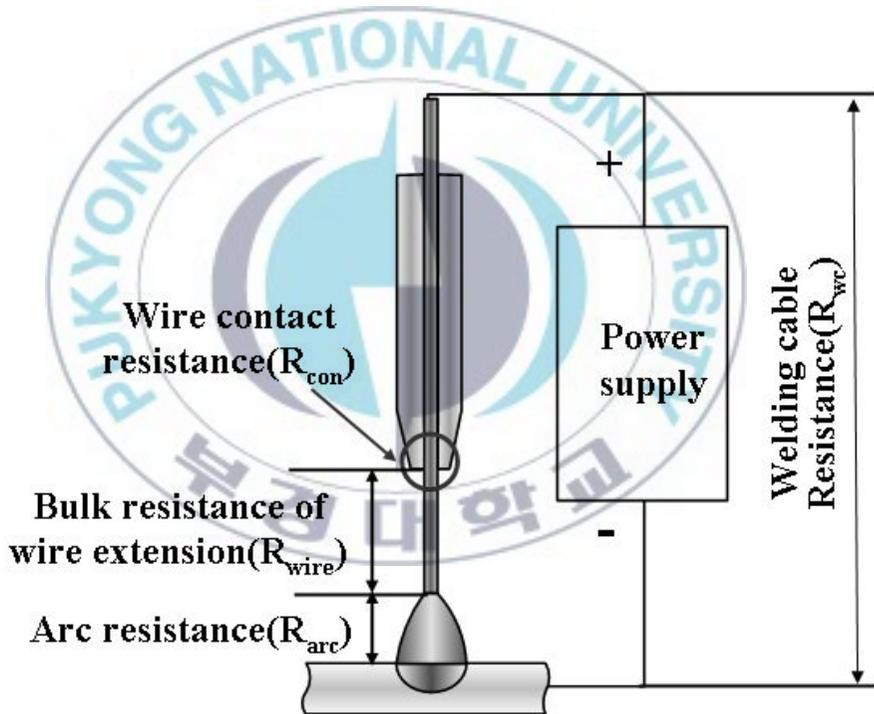


Fig. 2.5 Resistance factors of arc welding circuit

2.5 용접 케이블 저항에 의한 전력 손실⁴⁾

2.5.1 전압계를 사용한 케이블의 전압 측정

Fig 2.6은 전압계를 사용한 케이블의 전압 측정 방법의 모식도를 나타낸다. 이 방법은 정밀한 전압계를 사용하여 용접하는 동안 용접기 단자에서의 전압과 용접봉 홀더와 모재 결선 사이의 전압을 측정하는 것이다. 그때 전류센서를 이용하여 용접 전류도 측정한다.

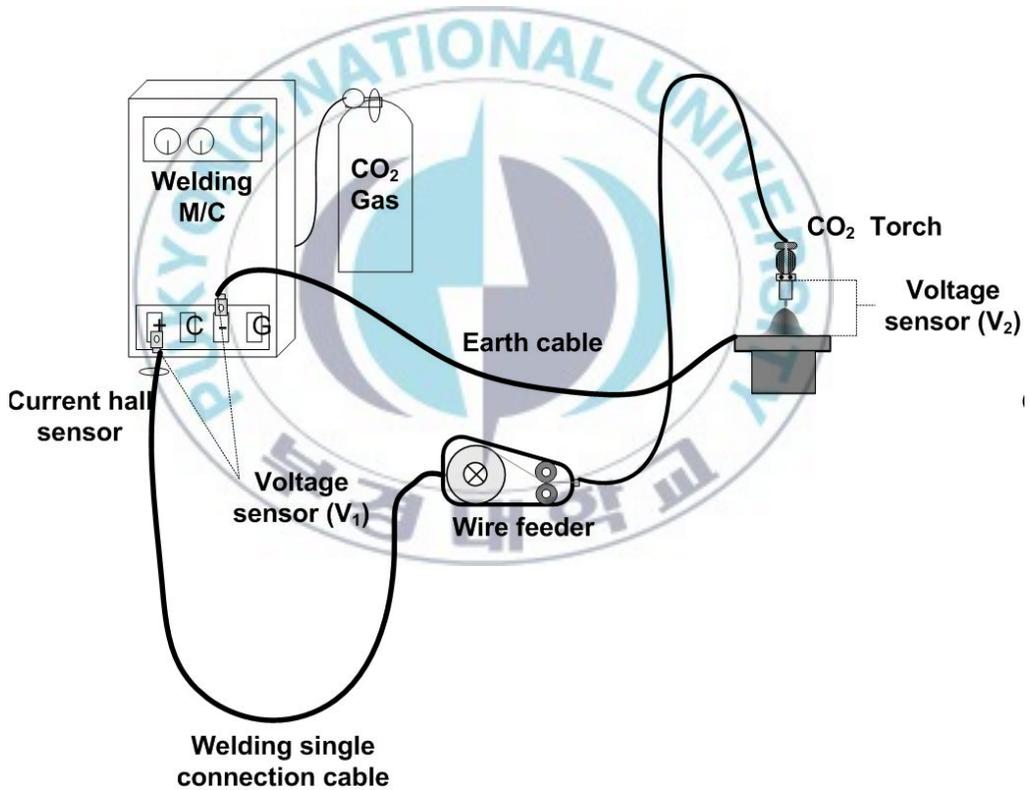


Fig. 2.6 Schematic of voltage measurement

전원 단자에서 측정된 전압과 용접봉 홀더와 모재 결선 사이에서 측정된 전압의 차이가 케이블에서 소실되는 전압이 된다. 이것을 측정된 용접 전류와 곱해 주면 케이블에서 소실된 전력의 양이 나온다. 이것을 식으로 나타낸 것이 식 (1)과 같다. 여기서 PL은 케이블의 전력손실(W), V1은 용접기 단자에서 측정된 전압(V), V2는 용접봉 홀더와 모재사이의 전압(V), 그리고 I(A)는 전류를 나타낸다.

$$PL = (V_1 - V_2) \times I \quad (1)$$



2.5.2 저항과 용접 전류를 이용한 전력 손실 계산

전력 손실을 결정하는 두 번째 방법은 용접케이블의 저항과 용접 전류의 제곱을 식(2)와 같이 곱하여 구하는 것이다. 치수별 케이블의 저항은 Table 2.1에 주어지 있다. 여기서 PL은 전력손실(W), I는 전류(A) 그리고 R은 도체 저항(Ω)을 나타낸다,

$$PL = I^2 R \quad (2)$$

Table 2.1 Comparison of american wire gage with metric system

AWG Size	Resistance at 68°F per 1000ft	Nominal cross sectional area by SI unit	Resistance at 20°C per 1000m
	Ω	mm^2	Ω
8	0.688	10	1.75
6	0.435	16	1.09
4	0.272	25	0.70
2	0.173	35	0.50
1	0.137	50	0.35
1/0	0.109		
2/0	0.087	70	0.25
3/0	0.068	95	0.18
4/0	0.054	120	0.146

2.5.3 치수별 전압 강하 검토

전력손실을 결정하는 세 번째 방법은 Table 2.2를 이용하는 것이다. 이것은 주어진 전류에서 용접할 때 30m(100ft) 길이의 회로에 대한 케이블의 치수별 전압 강하를 보여준다. 이 경우 전력 손실은 식 (3)과 같다. 여기서 PL은 전력손실(W), I는 전류(A), 그리고 VD(voltage drop)는 전압강하(V)를 나타낸다. Fig. 2.7은 전류에 따른 케이블 치수 별 전력 손실을 나타낸다. 케이블의 치수가 작을수록 전력 손실 기울기가 급격히 증가하는 것을 알 수 있다.

$$PL = I \times VD \quad (3)$$

Table 2.2 Voltage drop for AWG size depending on current

Welding current (A)	Voltage drop depending on cable size (AWG) per 100ft					
	2	1	1/0	2/0	3/0	4/0
50	1.0	0.7	0.5	0.4	0.3	0.3
75	1.3	1.0	0.8	0.7	0.5	0.4
100	1.8	1.4	1.2	0.9	0.7	0.6
125	2.3	1.7	1.4	1.1	1.0	0.7
150	2.8	2.1	1.7	1.4	1.1	0.9
175	3.3	2.6	2.0	1.7	1.3	1.0
200	3.7	3.0	2.4	2.0	1.5	1.2
250	4.7	3.6	3.0	2.4	1.8	1.5
300	-	4.4	3.4	2.8	2.2	1.7
350	-	-	4.0	3.2	2.5	2.0
400	-	-	4.6	3.7	2.9	2.3
450	-	-	-	4.2	3.2	2.6
500	-	-	-	4.7	3.6	2.8
550	-	-	-	-	3.9	3.1
600	-	-	-	-	4.3	3.4
650	-	-	-	-	-	3.7
700	-	-	-	-	-	4.0

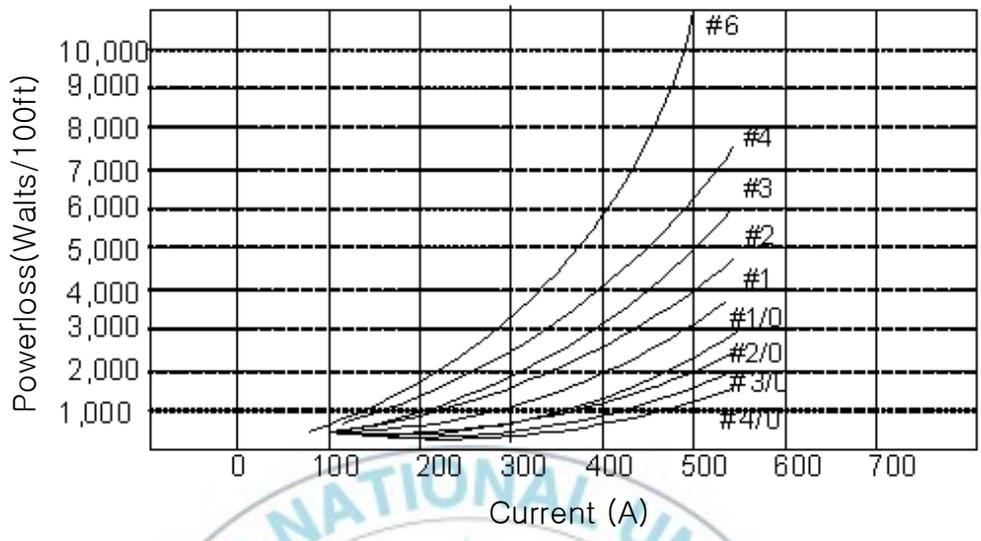
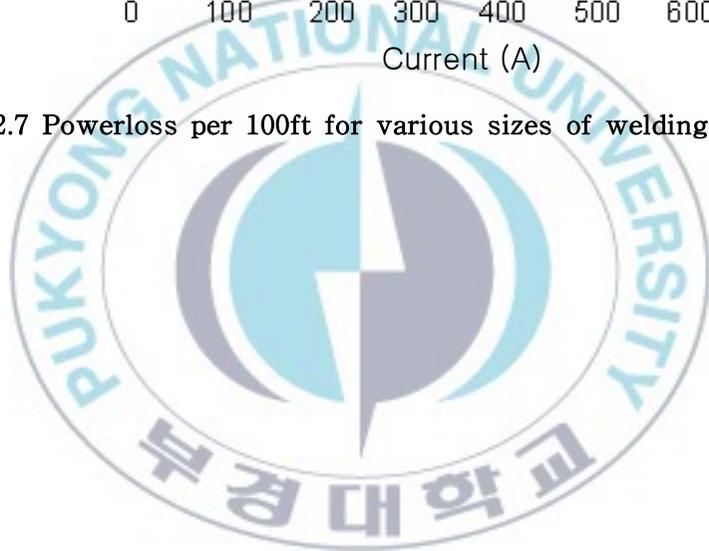


Fig. 2.7 Powerloss per 100ft for various sizes of welding cable



2.6 와이어 용융 속도의 정의

Fig. 2.8내의 식은 와이어 용융 속도(wire melting rate)에 대해 Halmoy가 주장한 식으로 크게 아크열에 의한 와이어 용융량과 와이어 저항 발열에 의한 와이어 용융량의 합으로 나타낸다. 와이어 용융 속도는 아크열에 의한 설정 전류, 와이어 저항발열에 의한 설정전류의 제곱 및 와이어 돌출길이에 비례하며 와이어의 단면적에 반 비례한다.

Wire melting rate(By eq. of Halmoy)

$$M(\text{kg/h}) = 6.5 \times 10^{-3} \times I + 2.88 \times 10^{-6} \times \frac{L_s I^2}{d^2}$$

where

	아크열에 의한 와이어 melting	와이어 저항 발열에 의한 와이어 melting
--	------------------------	------------------------------

M : Melting rate, kg/h
 I : Set current, A
 L_s : Wire stickout, mm. L : Arc length(mm)
 d : Wire diameter, mm

Fig. 2.8 Equation for wire melting rate

아래의 식은 J. Tusek et. al.에 의한 다른 용융효율 식⁵⁾으로 다음과 같다.

$$\eta(\%) = (100MEt) / \left(\int_0^t IUdt \right) \quad (4)$$

여기서 η 는 용융효율(%), M은 용융속도(g/sec), E는 감열과 잠열의 합(J/g), I는 전류, U는 전압 그리고 t는 시간이다.

2.7 GTAW에서 용접 전류와 단락 에너지 관계 검토

용접회로를 구성하는 편조동선의 길이, 직경, 모재 종류와 산화상태, 용접프로세스 종류, 컨택팁의 산화상태에 따라 설정전류가 동일하더라도 용접회로에 발생하는 단락에너지의 차이로 인해 아크에너지가 다를 수 있다. 또한 용접기 출력에너지와 아크에너지의 구분이 명확하지 않아서 아크효율 정의와 값에 일관성이 없는 것으로 보인다.

2.6.1 용접기 출력에너지 정의

Fig. 2.9는 용접기 출력 에너지를 나타내는 모식도이고 식(5)는 용접기 출력 에너지 식이다. 여기서, 용접기 출력에너지 E_m 은 용접회로에 흐르는 전류 I 와 용접기 터미널에서 측정되는 전압 V_m , 용접시간 t 의 곱으로 나타낼 수 있다.



Fig. 2.9 Current and voltage of machine output

$$E_m = I V_m t \quad (5)$$

2.6.2 단락에너지의 정의

용접시 용접회로의 저항으로 인해 발생한 열은 용접에 유효하지 못하며 이 열은 에너지손실을 유발하며, 본 연구에서는 단락에너지로 정의한다.

Fig.2.10은 단락에너지를 구하기 위한 모식도이다. 식(6)은 단락에너지에 대해 정의한 것으로 단락에너지는 전류 I와 용접기 터미널에서 측정되는 전압 E_s , 용접시간 t의 곱으로 나타낼 수 있다.

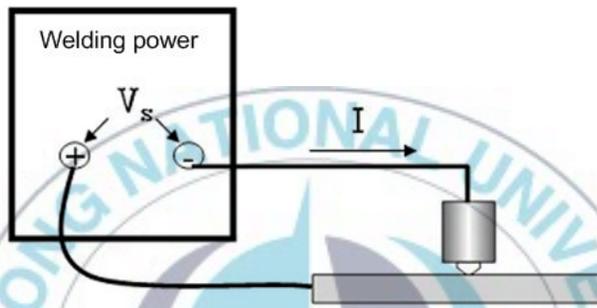


Fig. 2.10 Current and voltage of short circuit

$$E_s = I E_s t$$

(6)

2.6.3 아크 에너지의 정의

용접기의 출력에너지는 모재로 전부 투여되지 않고 단락에너지는 제외되어 모재에 투여된다.

TIG 용접전원은 정전류 특성 파워소스이다. 그래서 단락이 되거나 아크가 형성되어도 용접전류 I 는 일정하다. 따라서 용접기 출력에너지 식(5)와 단락에너지 식(6)을 정리하면 식(7)과 같이 나타낼 수 있다. 즉 아크에너지는 아크가 있을 때와 단락되었을 때의 전압차가 아크전압 V_a 이며 아크에너지 E_a 는 용접전류 I 와 용접시간 t , 아크전압 V_a 의 곱으로 나타낼 수 있다.

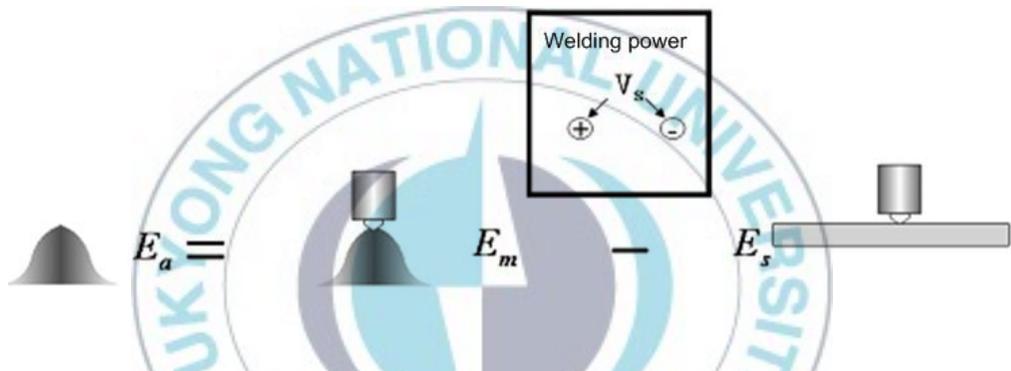


Fig. 2.11 Definition of the arc energy

$$E_a = E_m - E_s = I V_m t - I V_s t = I t (V_m - V_s) = I t V_a \quad (7)$$

E_m : Machine output energy

E_a : Short circuit energy

I : Current of welding circuit

V_m : Voltage of machine output

V_s : Voltage of short circuit

V_a : Voltage of arc

2.8 와이어 발열량의 정의

Fig. 2.12는 아크개시 때 발생하는 저항 발열과 아크 발열을 정의한 것이다. 초기 와이어가 모재와 접촉하여 단락을 한 후 일정시간 뒤에 아크가 발생된다. 이 때 용접 저항을 $100\text{m}\Omega$ 으로 기준으로 그 이하를 단락, 그 이상을 아크라 구분하였다. 각각의 경우에 해당되는 전류, 전압, 용접시간을 계산하여 발열량을 구한 것이 식(8)이다. 식(8)에서 Q_T 는 총 발열량, Q_S 와 Q_A 는 각각 단락시 저항 발열량과 아크 발열량을 나타낸 것이다. 이것은 식(9)와 식(10)으로 표현 할 수 있고, 최종적으로 Q_T 는 식(11)로 표현된다.

본 장에서는 arc monitoring system으로 계산되어진 평균용접전류(A), 평균 용접전압(V), 용접시간(t)을 식(12)와 식(13)을 사용하여 단락시 저항 발열과 아크 발열을 각각 계산하였다.

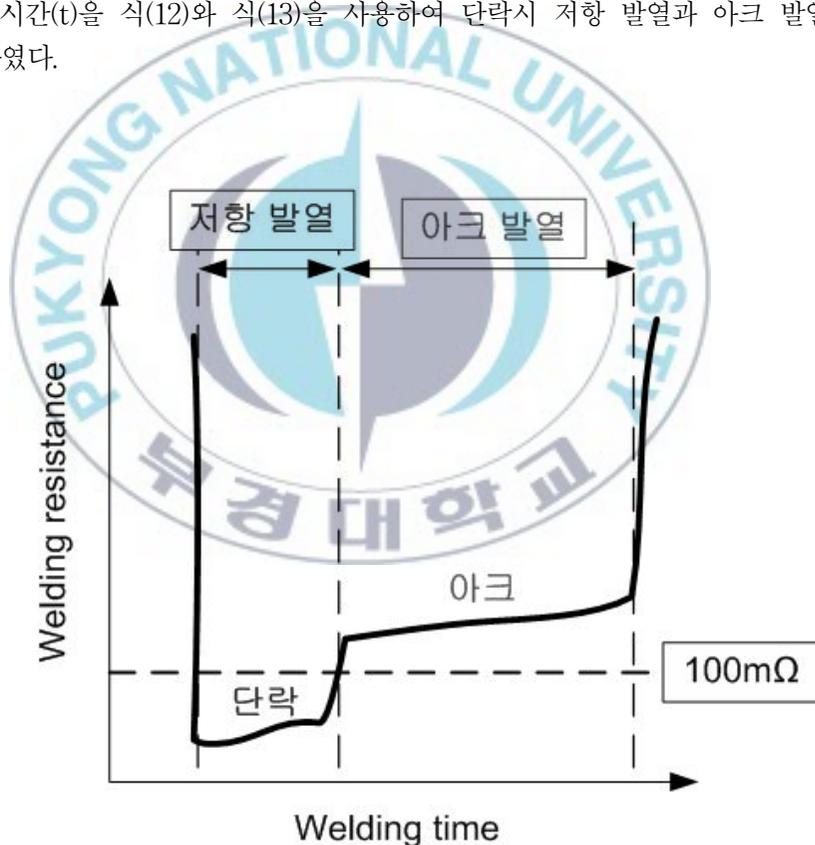


Fig. 2.12 Definition of heat generation

$$Q_T = \int P dt = \int P_S dt + \int P_A dt \text{----- (8)}$$

$$Q_S = \int \mathbf{i}_S \cdot \mathbf{v}_S \cdot dt \text{---- (9)} \quad , \quad Q_A = \int \mathbf{i}_A \cdot \mathbf{v}_A \cdot dt \text{---- (10)}$$

• 총 발열량

$$\Rightarrow Q_T = Q_S + Q_A \text{---- (11)}$$

• 단락시 저항 발열량

$$\Rightarrow Q_S = I \cdot V \cdot t \text{(J)---- (12)}$$

• 아크 발열량

$$\Rightarrow Q_A = I \cdot V \cdot t \text{(J)---- (13)}$$



2.9 온도에 따른 steel 와이어의 고유저항 특성

Fig. 2.13은 온도에 따른 steel wire의 고유저항을 나타낸 것으로서 이것은 와이어와 base metal이 단락을 하면 전류가 통전되어 와이어 자체의 저항 발열에 의해 온도가 상승하고 그로 인해 고유저항 값이 증가한다는 것을 단적으로 보여주는 그래프이다.

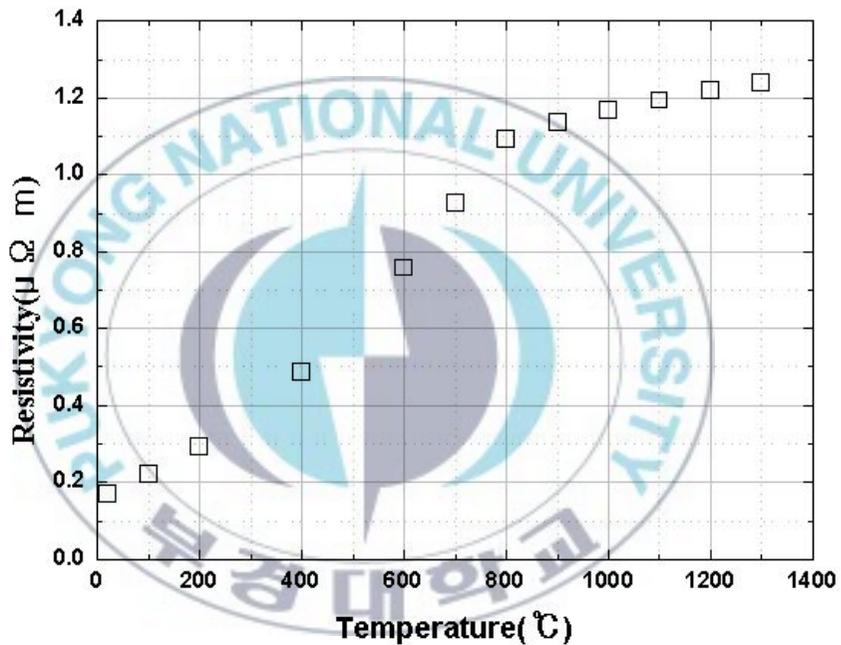


Fig. 2.13 Resistivity of steel with temperature

제 3 장 용접 회로 저항 측정

3.1 서언

본 장에서는 용접 회로 저항으로 인한 회로 전압 강하를 제외한 순수 아크 전압 강하만을 고려하여 아크 길이 추정을 하기 위한 기본 실험으로 용접 회로 저항을 측정하였다. 회로 저항 측정을 위해 케이블 저항 측정법과 단락 저항 측정법을 고려하였으며, 본 연구에서는 단락 저항 측정법을 사용하여 회로 저항을 측정하였다.

3.2 Jo 등의 논문 검토⁶⁾

Fig. 3.1은 Jo등에 의해 연구되었던 GTAW에서의 단락저항을 구하기 위해 사용되었던 케이블저항 측정법의 모식도이다. 아크 저항을 제외한 케이블 저항을 측정하기 위해 텅스텐 전극을 모재에 단락시킨 후 통전시켜 그 때의 저항 값을 측정함으로써 단락 저항을 측정하였다. Jo등은 순수 아크 에너지만을 고려해 아크 효율을 구하기 위해 다음의 실험을 하였다.

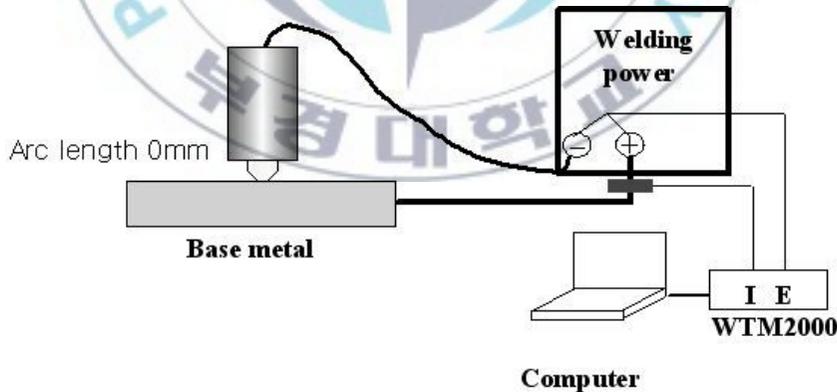


Fig. 3.1 Schematic of cable resistance method

Fig. 3.2는 용접전류에 대한 용접회로 저항과 용접기 출력측 터미널에서의 전압을 측정하는 것이다. 설정전류가 증가 하더라도 용접기 회로의 저항은 31.28mΩ으로 일정하고 전압은 전류에 비례하여 증가하였다.

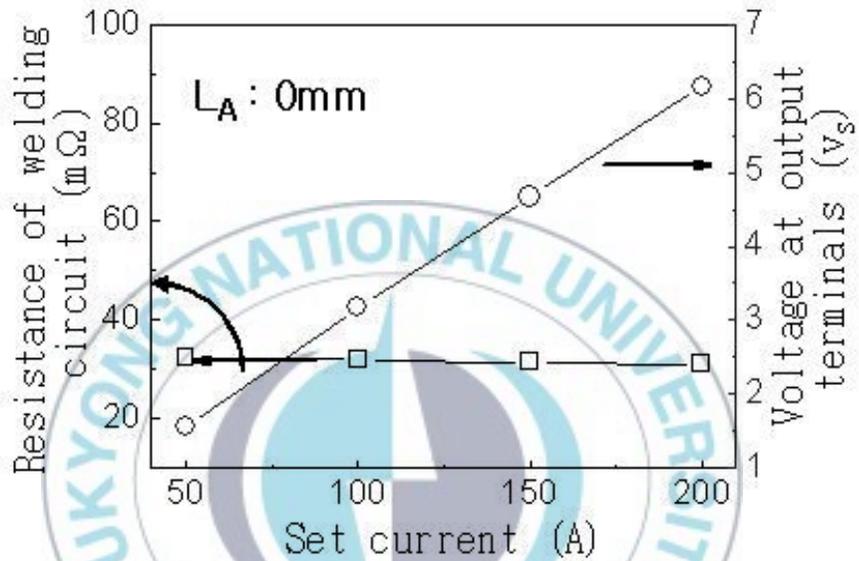


Fig. 3.2 Welding circuit resistance and voltage at output terminals with set current

3.3 실험 재료 및 방법

3.3.1 실험 재료

본 실험에서는 길이 120mm × 폭 40mm × 두께 6mm의 mild steel에 $\Phi 1.2$ mm flux cored wire(AWS A5.20)로 TAESIN KR-3 thyristor 제어방식의 용접기와 YASKAWA HP-6 6축 다관절로봇을 사용하여 bead on plate 용접 하였다. 용접 과정의 계측에는 Monitech HIWELD 계측 장비가 사용되었으며 계측 주파수는 7500Hz로 하였다. Fig 3.3과 3.4에 용접기와 로봇의 사진을 나타내었다.



Fig. 3.3 Welding machine
(TAESIN KR-3)



Fig. 3.4 Welding robot (HP-6)

3.3.2 실험 방법

Fig. 3.5는 본 연구에서 사용 된 단락저항 측정법의 모식도 및 회로저항의 구성 요소들을 나타내었다. 모재에 용접 와이어가 접촉하는 단락시에 용접기 출력 양단에 걸리는 저항을 측정함으로써 단락시 저항(R_{sc})을 측정하였다. 본 연구에서는 단락시 저항(R_{sc})을 용접 회로저항으로 간주하였다.

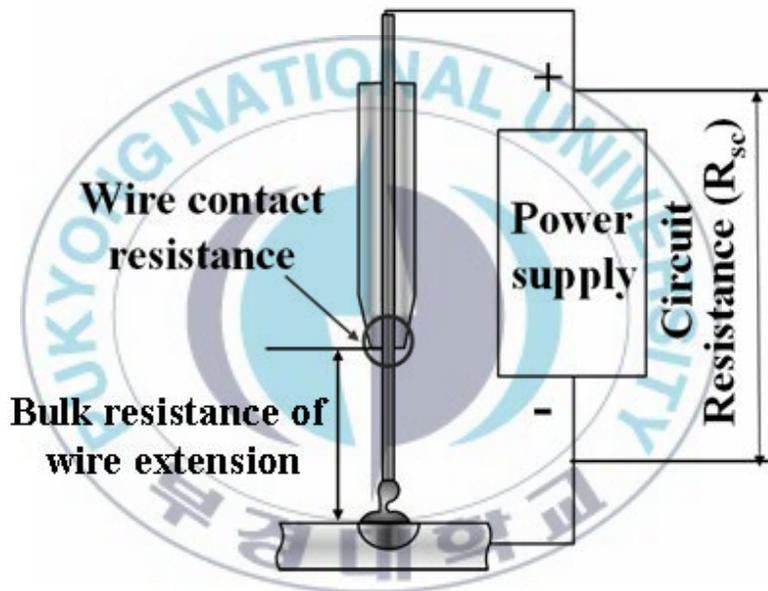


Fig. 3.5 Schematics of circuit resistance measurement

Table 3.1은 단락시 저항(R_{sc}) 측정을 위한 실험 조건을 나타낸다. 설정 용접 전압을 22V에서 28V까지 1V 단위로 증가시키며 실험하였다.

Table 3.1 Experimental conditions

Welding machine	TAESIN KRⅢ - 500
Base metal	Mild steel 120*40*t6
Welding wire	Flux cored wire Φ 1.2mm (AWS A5.20)
Joint type	Bead on plate
Shield gas	100% CO ₂ (20 l /min)
Welding speed	70cpm
Welding current	250A (CW)
CTWD	15mm
Welding voltage (varied)	22, 23, 24, 25, 26, 27, 28V

3.3 실험 결과 및 고찰

3.3.1 단락시 저항(R_{sc}) 측정

Fig. 3.6은 용접 전류, 전압, 저항 파형이며, 용접 저항 파형의 단락 구간을 이용하여 R_{sc} 를 구하는 방법에 대해서 나타내었다. 용접 전압 10V이하 구간을 단락 구간으로 정의 하였고, 그 때의 시간 주기를 단락 시간(t_{sc})으로 정의했다. t_{sc} 동안의 저항을 평균하여 R_{sc} 를 측정했고 이를 회로 저항으로 간주하였다.

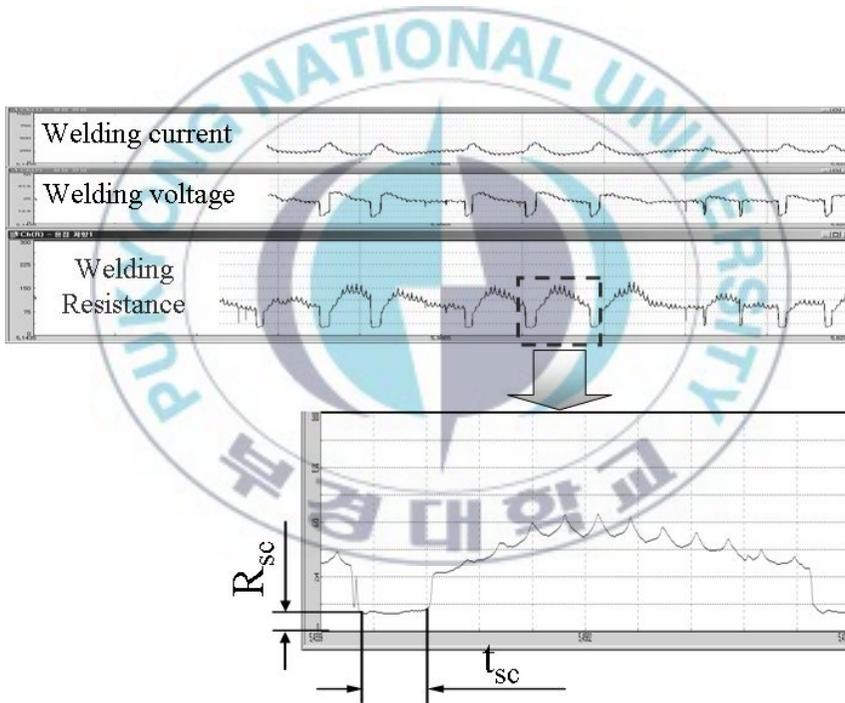


Fig. 3.6 Schematics of R_{sc} measurement at short circuit period

3.3.2 결과 및 고찰

Fig. 3.7에 단락저항 측정법으로 인해 측정 된 회로 저항, 즉 R_{sc} 를 나타낸다. 설정 전압을 22V에서 28V까지 1V 단위로 증가시켰으며, 각 설정 전압 조건 당 30개의 R_{sc} 값을 평균하여 하나의 점으로 나타내었다.

22~24V 조건에서 SCR(Short Circuit Ratio ; 단락 시간 / 전체 아크 시간)이 약 3~13%로 정상 단락 구간이 안정적으로 존재하여 R_{sc} 값이 설정 전압에 관계없이 평균 26.34m Ω 으로 일정했다. 따라서 이 값을 회로 저항으로 볼 수 있다. 반면 25V 이상의 설정 전압 조건에서는 SCR이 3% 이하로 낮아 정상 단락 저항에 도달하기 전에 단락이 해소되었다. 설정 전압의 증가에 따라 단락 해소 시간이 더욱 빨라졌고, 이로 인해 R_{sc} 가 증가하는 경향을 나타내었다.

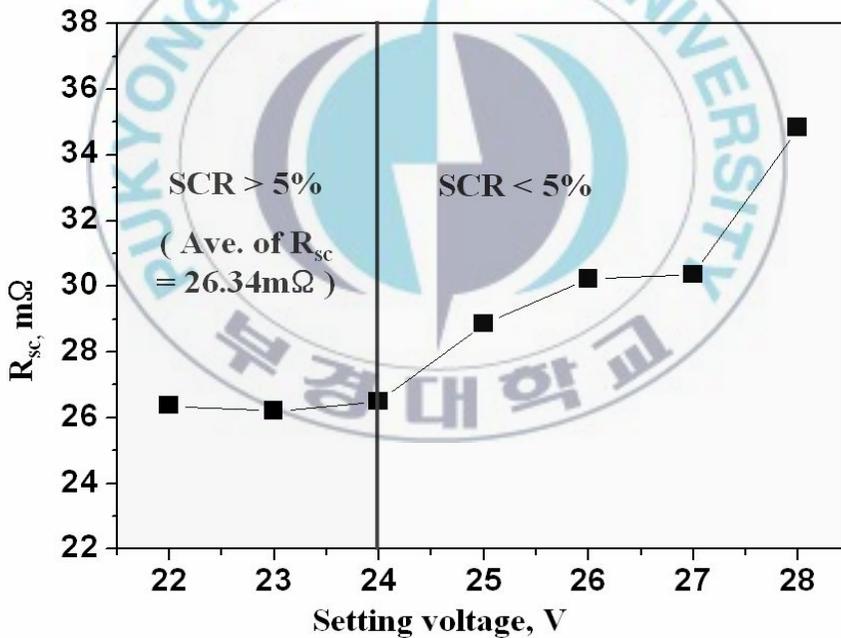


Fig. 3.7 Result of circuit resistance(R_{sc}) measurement

※ SCR (Short Circuit Ratio)

= Short circuit time / Total arc time

식(14)는 본 연구에서 사용 된 단락시 저항 측정법으로 인해 측정 된 R_{sc} 의 물리적 의미를 공식화한 것이다. 단락시 저항(R_{sc})는 용접 케이블 저항(R_{wc})과 컨택팁/와이어 간의 접촉저항(R_{con}), 돌출 와이어의 벌크저항(R_{wire})의 합으로 나타낼 수 있다. 따라서 R_{sc} 를 용접 회로저항으로 볼 수 있다.

$$R_{sc} = R_{wc} + R_{con} + R_{wire} \quad (14)$$

R_{wc} : Welding cable resistance

R_{con} : Wire contact resistance

R_{wire} : Bulk resistance of wire extension

H YAMATO 등의 연구에서는 용접 회로 저항을 식(15)와 같이 정의하였다. 그들은 와이어 단위 길이 당 저항(R_0)과 돌출 와이어의 길이(y)를 곱함으로써 용접 회로 저항을 구하였다. H YAMATO 등의 연구에서는 용접 전압을 용접 토치와 모재 사이에서 측정하였기 때문에 용접 회로 저항의 한 요소인 용접 케이블 저항을 제외하고 돌출 와이어에 의한 저항만을 고려하였고 컨택팁/와이어 접촉저항은 무시하였다.

하지만 본 연구에서는 용접 전원 출력 양단에서 용접 전압을 계측하였기 때문에 용접 케이블 저항도 고려하였고, H YAMATO 등이 무시했던 컨택팁/와이어 접촉저항까지 고려할 수 있는 단락시 저항을 회로저항으로 간주하였다.

$$R_{sc} = R_0 y \quad (15)$$

R_0 : Resistance per unit length of welding wire

y : Wire extension

3.4 결론

단락 저항 측정법을 사용하여 회로저항을 측정한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 단락시간비(Short circuit ratio) 5% 이상의 용접 조건에서 단락시 저항을 측정해야 안정적으로 회로저항을 측정할 수 있다.

2) 용접 케이블 저항(R_{wc})과 콘택팁/와이어 간의 접촉저항(R_{con}), 돌출 와이어의 벌크 저항(R_{wire})을 모두 고려하는 본 연구에 사용된 용접 회로의 회로 저항은 $26.34m\Omega$ 으로 측정되었다.



제 4장 아크 피크 전압(V_{ap}) 측정에 따른 순수 아크 전압 강하(V_{arc}) 계산

4.1 서언

본 장에서는 아크 발생시 용접 회로 전체에 걸리는 전압 강하를 나타내는 아크 피크 전압(V_{ap})를 측정하였고, 측정 된 V_{ap} 에서 3장에서 구해진 단락시 전압(R_{sc})를 이용하여 계산 된 회로 전압 강하를 뺄으로써 순수 아크 전압 강하(V_{arc})를 계산하였다.



4.2 실험 재료 및 방법

4.2.1 실험 재료

본 실험에서는 3장과 동일하게 길이 120mm × 폭 40mm × 두께 6mm의 mild steel에 Φ 1.2mm flux cored wire(AWS A5.20)로 용접 실험하였다.

4.2.2 실험 방법

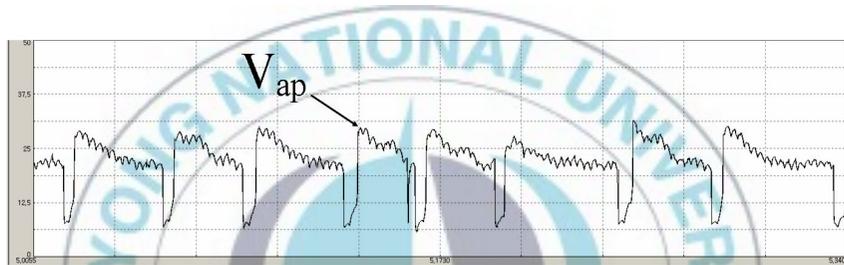
Table 4.1은 실험 조건을 나타내어다. 설정 용접 전압을 22V에서 34V로 변경하였고, 나머지 실험 조건은 3장과 동일하다.

Table 4.1 Experimental conditions

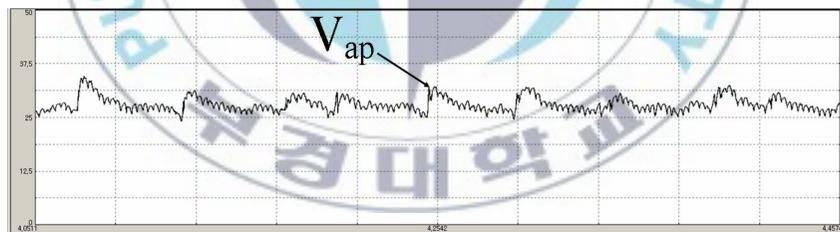
Welding machine	TAESIN KRⅢ - 500
Base metal	Mild steel 120*40*t6
Welding wire	Flux cored wire Φ 1.2mm (AWS A5.20)
Joint type	Bead on plate
Shield gas	100% CO ₂ (20 ℓ /min)
Welding speed	70cpm
Welding current	250A (CW)
CTWD	15mm
Welding voltage (varied)	22, 24, 26, 28, 30, 32, 34V

(1) 용접 전압 파형을 이용한 아크 피크 전압(V_{ap}) 측정

Fig. 4.1에는 단락 이행 모드와 입상 용접 이행 모드인 경우의 용접 전원의 출력 단자(+,-)에서 측정된 전압 파형을 나타내었으며, 전압 파형에서의 V_{ap} 를 정의하였다. 하나의 용적 이행 주기 동안의 최대 전압, 즉 용적 이행 후 전압의 기울기가 +에서 -로 바뀌는 지점에서의 전압을 V_{ap} 로 정의하였다. 본 연구에서는 Fig. 4.1 같은 실제 용접 전압 파형을 이용하여 각 설정 전압 조건 당 30개의 아크 최대 전압 값을 직접 측정하여 평균함으로써 V_{ap} 를 구하였다.



(a) V_{ap} in the case of short circuit transfer mode



(b) V_{ap} in the case of globular transfer mode

Fig. 4.1 Definition of arc peak voltage(V_{ap})

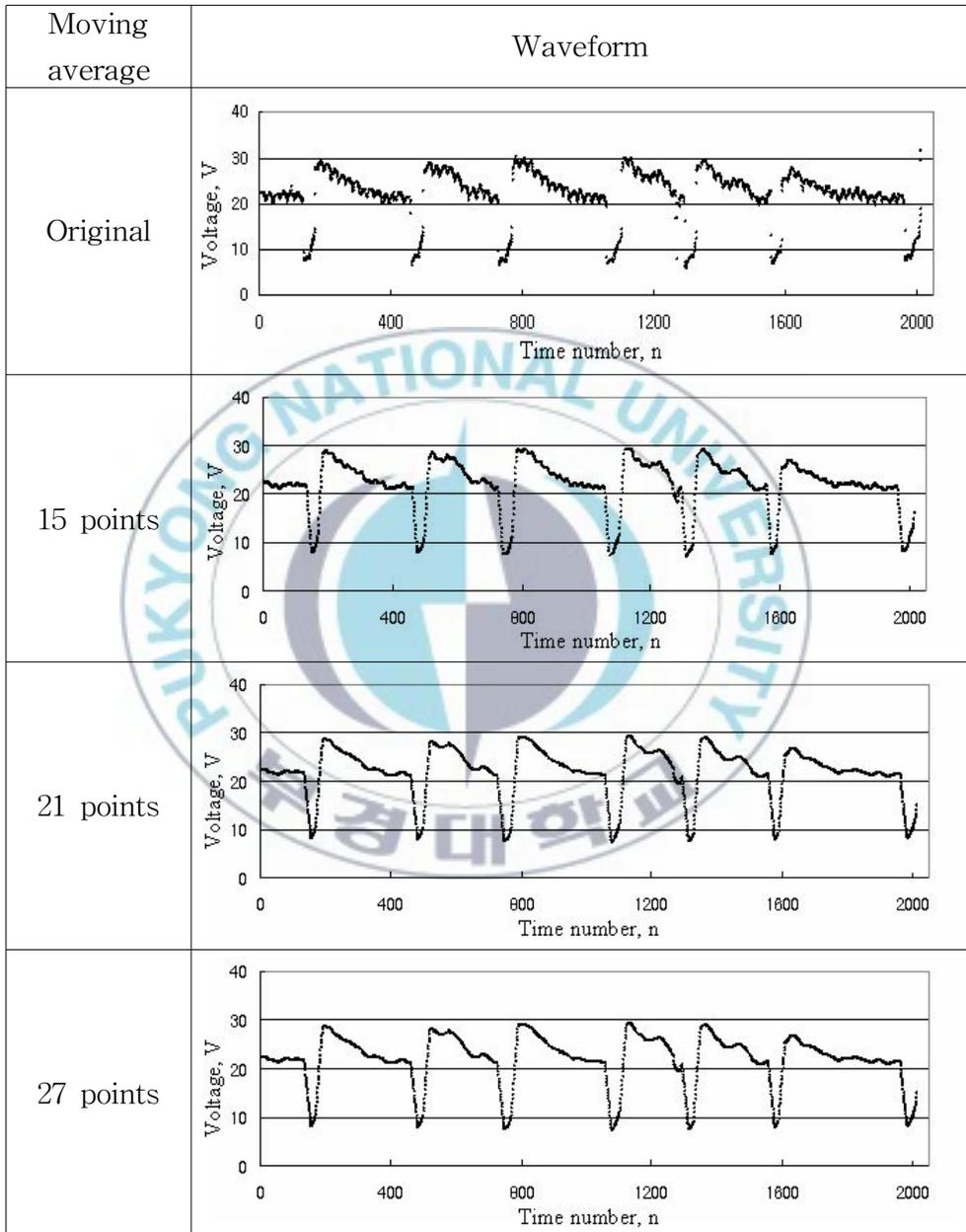
(2) 용접 전압 데이터의 다점 이동 평균법을 이용한 필터링

아크 길이 추정 방법의 실제 현장 적용 시, 전압의 기울기가 +에서 -로 바뀌는 지점의 전압 값을 V_{ap} 로 자동으로 판단해야 하는데, Fig. 4.1이나 Table. 4.2의 이동평균 되지 않은 원본 전압 파형을 보면, thyristor 출력 주파수 특성을 가지는 미세한 ripple이 전압의 기울기라는 수학적 파라미터로 V_{ap} 를 판단함에 있어서 noise로 작용할 것이다.

이러한 ripple을 제거하기 위해 전압을 이동 평균하였고, 이동평균점의 개수에 따른 전압 파형을 Table. 4.2에 나타내었다. Table. 4.2의 맨 위부터 아래로 각각 이동평균 전의 원본 전압 파형, 15점, 21점, 27점 이동평균 전압 파형을 나타낸다. Table. 4.2에 나타난 바와 같이 350Hz의 thyristor 출력 특성으로 인한 불필요한 미세 ripple을 제거하면서도 원본 전압 파형의 패턴을 크게 왜곡 시키지 않는 21점 이동평균법이 가장 합리적일 것으로 판단된다.

이는 본 연구에서의 용접 파형 계측 주파가 7500Hz로 thyristor 출력 주파수의 약 21배이기 때문이다. 다시 말해, 하나의 thyristor 신호로 인한 전압 파형의 변동을 나타내는 미세 ripple 하나는 약 21개의 데이터 점으로 이루어져 있으며, 이를 다시 하나의 데이터 점으로 바꾸기 위해서는 21점 이동평균이 가장 합리적이라고 할 수 있다.

Table. 4.2 Voltage waveform with point number for moving average



4.3 실험 결과 및 고찰

Fig. 4.2에 측정된 용접 전압과 V_{ap} 간의 상관관계를 나타내었다. 용접 전압이 증가할수록 V_{ap} 역시 증가하는 경향을 나타내었다

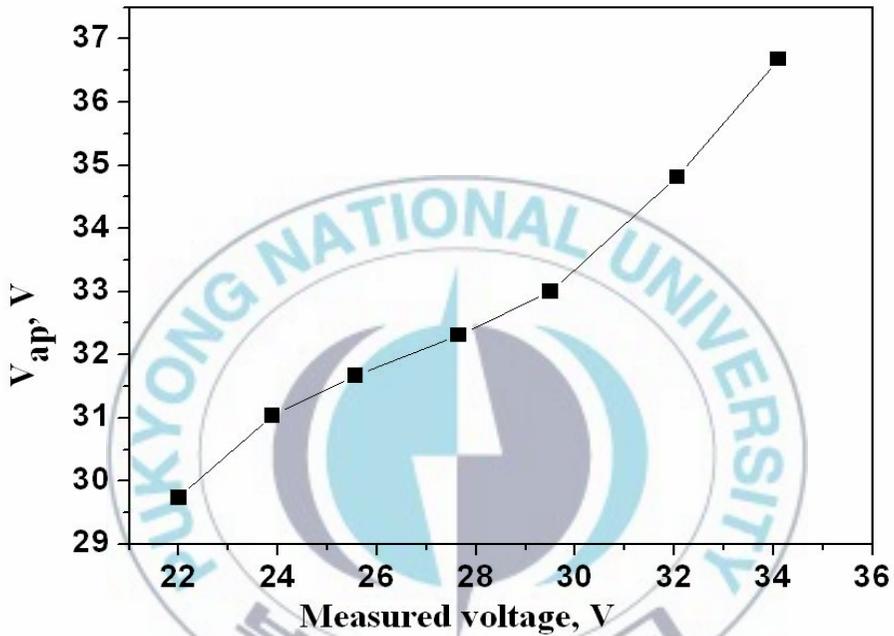


Fig. 4.2 Relationship between measured voltage and V_{ap}

식 (16)과 같이 용접 시 회로 전압 강하와 아크 전압 강하를 모두 포함하는 아크 피크 전압(V_{ap})에 회로 전압 강하(V_{sc})를 나타내는 항인 아크 피크 전류(I_{ap})와 용접 회로 저항(R_{sc})의 곱을 뺀으로써 순수 아크 전압 강하(V_{arc})를 계산할 수 있다.

$$V_{arc} = V_{ap} - (I_{ap} \times R_{sc}) \quad (16)$$

V_{arc} : Net arc voltage

I_{ap} : Arc peak current

R_{sc} : Short circuit resistance

식 (17)은 H YAMATO 등의 연구⁷⁾에 의한 순수 아크 전압 강하 계산식을 나타낸다. 그들은 알고자하는 time에서 측정된 용접 전압(V_t)에 돌출 와이어의 저항에 의해 발생하는 전압 강하 성분($R_{oy}I$)를 뺀으로써 순수 아크 전압 강하를 계산하였다.

전체 용접 전압에서 회로 전압 강하 성분을 뺀으로써 순수 아크 전압 강하를 계산해 낸다는 측면에서 H YAMATO 등에 의한 순수 아크 전압 강하 계산은 연구에서의 그 것과 매우 유사하다.

$$V_a = V_t - R_{oy}I \quad (17)$$

V_a : Arc voltage

V_t : Electrical supply voltage

I : Welding current

4.4 결론

아크 피크 전압(V_{ap}) 측정에 따른 순수 아크 전압 강하(V_{arc}) 계산에 관한 연구 결과 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 순수 아크 전압 강하(V_{arc})는 설정 전압 증가에 비례하여 증가하였다.
- 2) 용접 시 회로 전압 강하와 아크 전압 강하를 모두 포함하는 아크 피크 전압(V_{ap})에 회로 전압 강하(V_{sc})를 나타내는 항인 아크 피크 전류(I_{ap})와 용접 회로 저항(R_{sc})의 곱을 뺀으로써 순수 아크 전압 강하(V_{arc})를 계산할 수 있는 방법을 제안하였다.



제 5 장 순수 아크 전압 강하(V_{arc})와 아크 길이(L_{arc})의 상관관계 검토

5.1 서언

본 장에서는 고속 카메라 촬영에 의해 영상 분석을 통해 각각의 용접 전압 조건에 따른 실측 아크 길이(L_{arc})를 측정하였고, 측정 된 아크 길이(L_{arc})와 순수 아크 전압 강하(V_{arc}) 사이의 상관관계를 1차 선형 회귀분석함으로써 아크 길이 추정식을 도출하였다.

5.2 실험 재료 및 방법

5.2.1 실험 재료

본 실험에서는 3장과 동일하게 길이 120mm × 폭 40mm × 두께 6mm의 mild steel에 $\Phi 1.2$ mm flux cored wire(AWS A5.20)로 용접 실험하였다.

5.2.2 실험 방법

Table 5.1에 용접 실험 조건을 나타내었다. 4장에서와 마찬가지로 용접 전압을 22V에서 34V까지 2V단위로 증가시키며 실험하였다.

Table 5.1 Experimental conditions

Welding machine	TAESIN KRⅢ - 500
Base metal	Mild steel 120*40*t6
Welding wire	Flux cored wire Φ 1.2mm (AWS A5.20)
Joint type	Bead on plate
Shield gas	100% CO ₂ (20 ℓ/min)
Welding speed	70cpm
Welding current	250A (CW)
CTWD	15mm
Welding voltage (varied)	22, 24, 26, 28, 30, 32, 34V

Fig. 5.1과 Table 5.2에 각각 실험 모식도와 고속카메라 촬영 조건을 나타내었다. 고속 카메라 촬영을 통한 아크 길이 측정을 위해 TIG back light와 high speed camera가 사용 되었고, 그 사이에 고정 되어있는 FCAW torch와 60rpm의 속도로 직선 이동하는 base metal을 위치시켰다. TIG back light와 FCAW torch, high speed camera는 일직선상에 놓이게 배치하였으며 각각의 거리를 200mm, 400mm로 하였다.

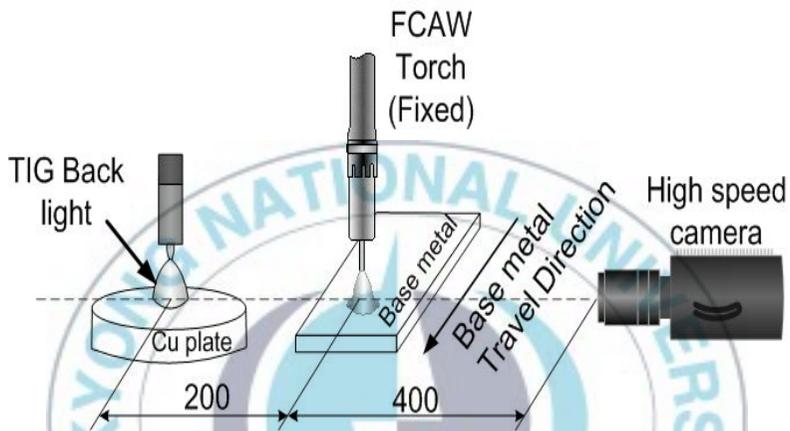


Fig. 5.1 Schematic of experiment

Table 5.2 Condition of high speed camera photographing

High speed camera body	Phantom v7.2
Lens	Nikon 105mm micro F2.8D
Filter	TOPAZ UV 52mm HOYA IR R72 52mm
Sampling frequency	5000fps
Exposure time	180 μ sec

Fig. 5.2는 고속 카메라 영상을 이용한 아크 길이(L_{arc}) 측정 방법을 나타낸다. 하나의 용접 이행 후 아크 길이가 최대가 되는 지점에서의 와이어 끝과 모재 사이의 거리를 측정하였다. 각 용접 조건 당 30개의 최대 아크 길이 측정 후 평균하여 L_{arc} 를 구했다.

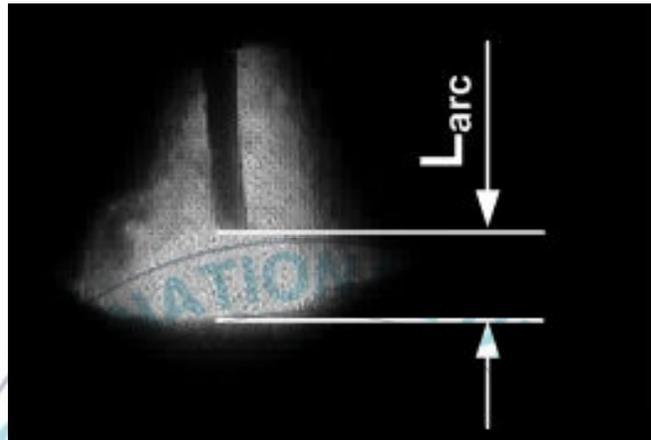


Fig. 5.2 Arc length(L_{arc}) measurement by high speed camera frame capture

5.3 실험 결과 및 고찰

Table 5.3에 설정 전압에 따른 용접 비드 표면과 전형적인 아크 길이를 나타내는 고속 카메라 프레임을 나타내었다. 전압이 증가함에 따라 아크 길이가 길어지고, 그에 따른 아크 직경 증가로 용접 비드 폭이 증가하는 경향을 나타내었다.

Table 5.3 Bead appearances and typical frames with set voltage

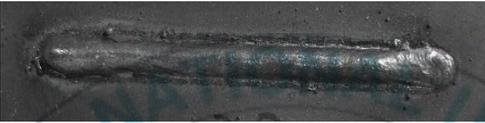
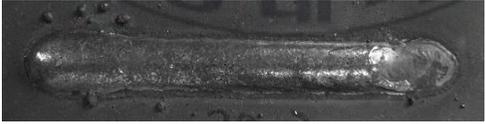
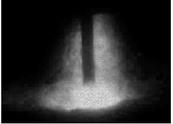
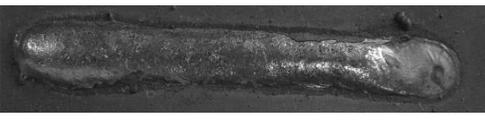
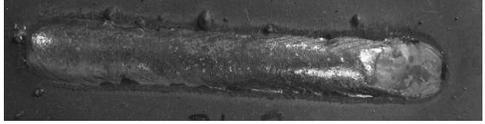
Set Voltage, V	Bead appearance	Typical frame
22		
24		
26		
28		
30		
32		
34		

Fig. 5.3은 가로축을 측정 번호, 세로축을 L_{arc} 로 하여, V_{arc} 와 각 V_{arc} 조건 당 30개씩 측정된 L_{arc} 와의 상관관계를 나타낸다. 그리고 Fig. 5.4는 V_{arc} 와 30개의 L_{arc} 값을 각 V_{arc} 조건별로 평균한 값의 상관관계를 나타낸다. V_{arc} 가 증가함에 따라 L_{arc} 도 선형적으로 증가하는 경향을 나타내었다.

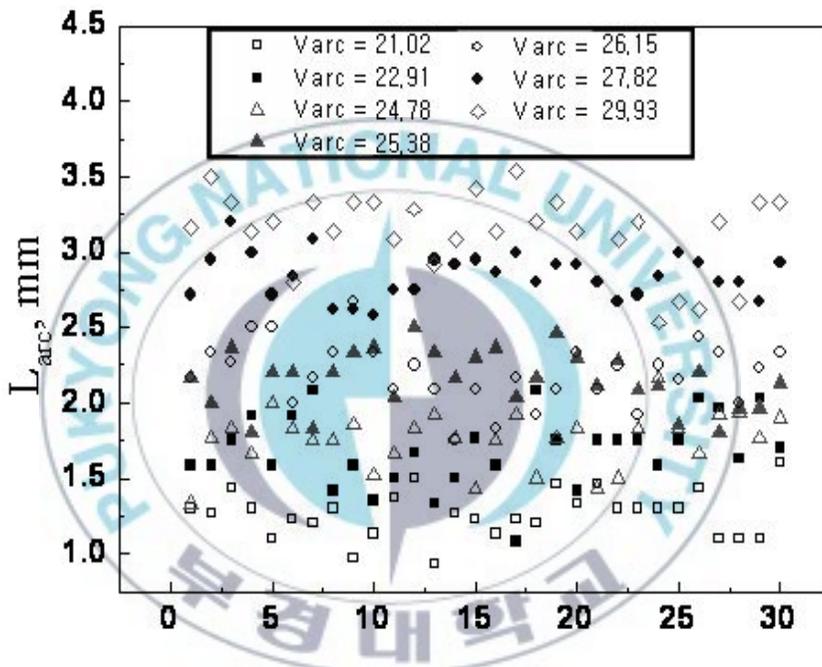


Fig. 5.3 Relationship between V_{arc} and L_{arc} with no. of measurement

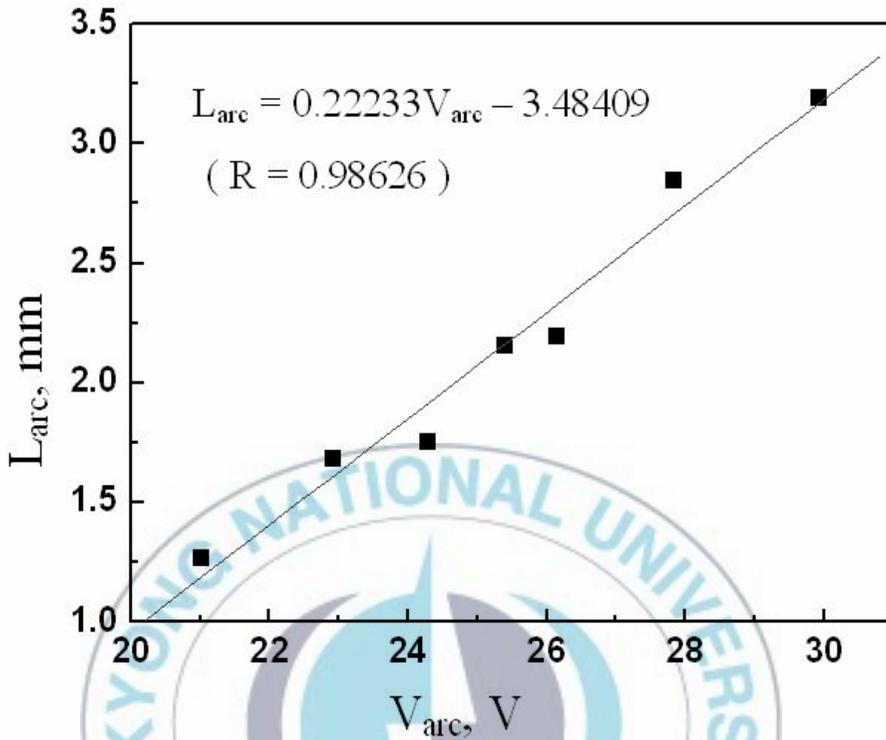


Fig. 5.4 Relationship between average of V_{arc} and L_{arc}

L_{arc} 와 V_{arc} 의 상관관계에 대한 1차 회귀 분석을 통해 식(18)과 같은 아크 길이 추정 방정식을 도출하였고, 상관 계수 R 은 0.99194로 나타났다.

$$L_{arc} = 0.22233V_{arc} - 3.48409 \quad (\text{단, } V_{arc} \geq 15.67) \quad (18)$$

Herschel B. Smartt⁸⁾ 등은 식 (4)와 같이 L_{arc} 를 용접 전압, 전류의 함수로 정리 하였지만, 본 연구에서는 식 (19)와 같이 V_{ap} 에서 V_{sc} 를 제외한 순수 아크 전압의 함수로 아크 길이 추정 식을 도출하였다.

$$L_{arc} = C_0V + C_1/I + C_2I \quad (19)$$

Herschel B. Smartt 등에 의한 식(4)에서 V 는 용접 전압, I 는 용접 전류, C_0 , C_1 , C_2 는 상수이다.

Fig. 5.5는 아크 길이 추정 기본 알고리즘에 대한 flow chart를 나타내었다. 이 알고리즘을 요약하자면, 본 용접 전에 단락 시간비 5% 이상의 조건에서 시험 용접을 통하여 회로 저항 R_{sc} 를 측정하고, 본 용접에서 V_{ap} 와 I_{ap} 값을 측정하여 획득한다. 이후에 식(16)을 통하여 V_{arc} 를 계산하고, 아크 길이 추정식인 식(18)에 V_{arc} 를 대입하여 최종적으로 아크 길이를 추정하는 기본 흐름을 가진다.

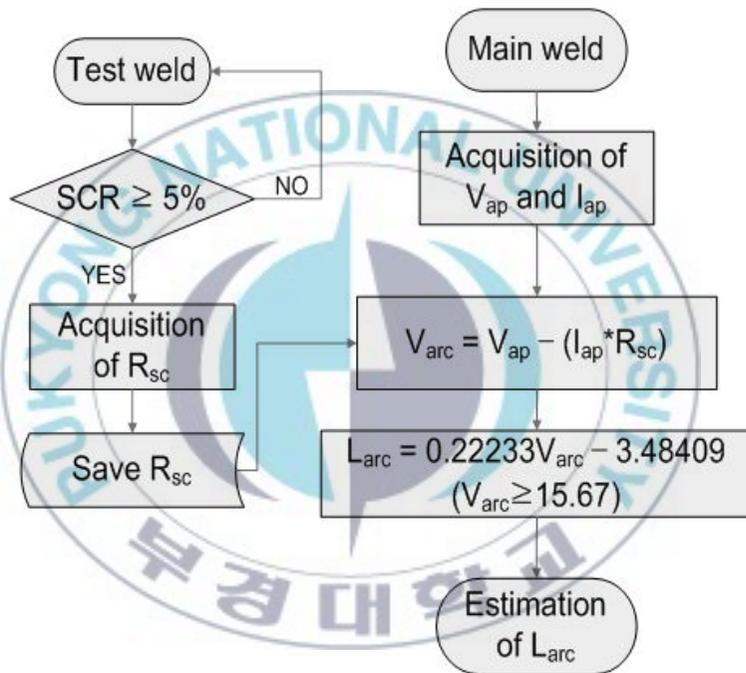


Fig. 5.5 Basic algorithm of arc length estimation

5.4 결론

두께3mm의 박판에 비드 온 플레이트용접에서 구속재간 거리를 30mm로 고정하고, 구속재의 열전도도를 변경하여 용접한 후 그 변형특성에 대해 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 순수 아크 전압 강하(V_{arc})와 고속 카메라 측정을 통한 실측 아크 길이(L_{arc})에 대한 상관관계 검토 결과, 순수 아크 전압 강하(V_{arc})에 비례하여 아크 길이가 증가하는 경향을 나타내었고 이에 대한 1차 회귀분석을 통해 아크 길이 추정식을 도출하였다.
- 2) 아크 길이 추정식과 그에 대한 기본 알고리즘을 통해 용접 시 inline에서 용접 전류, 전압 파형을 모니터링 하는 것만으로 L_{arc} 를 합리적으로 추정하는 방법을 제시하였다.



제 6 장 결론

FCAW에서의 아크 길이 추정 방법 개발에 관한 연구 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 용접 케이블 저항, 와이어 접촉 저항, 돌출 와이어 벌크 저항을 모두 고려하는 단락 저항 측정 방법을 써서 회로저항(R_{sc})을 측정하는 방법을 제시하였다.
- 2) 아크 피크 전압(V_{ap})에 회로 저항(R_{sc})과 아크 피크 전류(I_{ap})를 곱함으로써 계산 되는 회로 전압 강하(V_{sc})를 뺀으로써 순수 아크 전압 강하(V_{arc})를 계산하는 방법을 제시하였다.
- 3) 순수 아크 전압 강하(V_{arc})와 고속 카메라 측정을 통한 실측 아크 길이(L_{arc})에 대한 상관관계 검토 결과, 순수 아크 전압 강하(V_{arc})에 비례하여 아크 길이가 증가하는 경향을 나타내었고 이에 대한 1차 회귀분석을 통해 아크 길이 추정식을 도출하였다. 따라서 용접 시 inline에서 용접 전류, 전압 파형을 모니터링 하는 것만으로 L_{arc} 를 합리적으로 추정하는 방법을 제시하였다.

참고문헌

1. 용접 집합 편람 - 대한 용접 학회 1998, (pp.518-522)(in Korean)
2. Modern welding technology - Howard B. Cary (pp. 152-163)(in Korean)
3. A Study on the Optimal Condition for Minimizing Spatter Generation at GMAW Robot, Han-sik Kim et al, J. Korean Society of Industrial Application, Vol.11, No.2, 83-91, May, 2008
4. A study on variation of current, voltage drop and heat input depending on heat condition of welding single cable, Joung-hyun Lee, Master's thesis of Pukyung national university, Feb. 2008(pp.32-34)(in Korean)
5. M. Suban, J. Tusek : High-productivity multiple-wire submerged-arc welding and cladding with metal-powder addition, Journal of Materials Processing Technology, 133(2003), pp. 207~213
6. Development and application of high performance calorimeter to measure the melting efficiency of GTAW, Jin-An Cho, Master's thesis of Pukyung national university Feb. 2007(pp. 40)(in Korean)
7. Estimation of arc length and wire extension using neural network, H YAMATO and TAKANO et al, Welding international, 2004 15 (5) 357-364
8. Intelligent Control of Modular Robotic Welding Cell, Herschel B. Smartt, Kevin L. Kenney, Charles R. Tolle, 6th International Conference on Trends in Welding Research 15-19 April 2002

9. Stand off's indirect estimation in GMAW, S.C. Absi Alfaro., G.C. Carvalho, S.A. de Melo Junior, Journal of Materials Processing Technology 157 - 158 (2004) 3 - 7
10. Feedback Linearization based Arc Length Control for Gas Metal Arc Welding, Jesper S. Thomsen, 2005 American Control Conference, June 8-10, 2005
11. Advanced Control Methods for Optimization of Arc Welding, Jesper Sandberg Thomsen, Ph.D. Thesis
12. Process behavior and stability in short circuit gas metal arc welding, M.J.M Hermans and G. Den ouden, Welding Research Supplement, April, 1999 (pp. 137 - 141)
13. Intelligent Control of Modular Robotic Welding Cell, Herschel B. Smartt, 6th International Conference on Trends in Welding Research, 15-19 April 2002
14. A Study on Bead Height Control of GMAW by Short Circuit Time Ratio, Byoung-Oh Kam, Sang-Myung Cho, Sang-Bong KIM, Korean society of ocean engineering (2002) pp. 53~59(in Korean)

학위과정 중 주요 학술지 게재 및 발표논문

1. 주요 학술지 게재 논문

(1) 배광무, 조상명, FCAW에서의 아크 길이 추정 방법 개발에 관한 연구, 대한용접접합학회지, 투고 중

2. 학술발표대회 발표논문

(1) 배광무, 오재환, 조상명, 필릿 각장과 토치 위빙이 로봇 용접의 부품 fit-up 허용공차에 미치는 영향, 대한용접학회 춘계 학술발표대회 초록집, 48권 (2007), 11, p300

(2) 배광무, 박금기, 윤훈성, 김선근, 윤종필, 손완태, 조상명, LNG선 화물 탱크 Invar 저항 seam 용접용 Inverter DC 용접기의 개발, 한국마린 엔지니어링학회 논문집 (2008), 6, p305

(3) 배광무, 조상명, FCAW에서의 아크 길이 추정 방법 개발에 관한 연구, 대한용접접합학회 2008년 추계 학술발표대회 발표

감사의 글

2004년 9월부터 지금까지의 4년 반이라는 시간은 많은 연구실원들과 공부하고 같이 프로젝트를 수행하면서 지식뿐만 아니라 삶의 지혜 또한 얻을 수 있었던 소중한 기회가 된 것 같습니다.

가장 먼저, 전공지식뿐만 아니라 문제에 대한 접근 방법, 위기 대처 능력, 인간관계, 리더십과 같은 지혜도 함께 가르쳐주신 지도 교수님인 조상명 교수님께 감사드립니다.

대학원 과정에서 많은 지도를 해주신 김인철 교수님, 배동명 교수님, 구자삼 교수님, 배성룡 교수님, 이운식 교수님, 민경철 박사님께도 진심으로 감사드립니다.

연구실에 들어와서 큰 선배로서 항상 든직하게 생활하셨던 고명훈 선배님, 항상 친동생처럼 따뜻하게 대해주셨던 추용수, 박덕조, 고찬식, 유광선, 김인태, 고미혜, 조진안, 윤승중, 김영주, 김대만, 이정현, 문영덕, 김진욱, 함효식, 김성덕님께 고마움을 전합니다. 그리고 막내 시절을 같이 보낸 연구실 입실동기 황규민님, 저의 대학원 동기이자 단짝이었던 추환수님과 유일한 조선시스템관리공학협동과정의 동기 운영현님, 현재 연구실에서 두 번째로 예쁜 김효원님, 미스터 퍼펙트 정동희님께 고마움을 전합니다. 마지막으로 연구실 생활에 있어서 값진 고마움을 주고 항상 열심히 노력하는 임성빈, 하종문, 신희섭, 서지석님, 그리고 저를 형처럼 잘 따라왔던 부사수 박경도님께 사수로써 잘 챙겨주지 못한 미안함과 고마움을 전하며, 저의 실험에 많은 도움을 주었던 81년생 모임의 정회원 김성호, 정연호님께 감사드립니다. 그리고 항상 연구실원들을 따뜻한 마음으로 돌봐주신 박미숙님, 김외숙님께도 감사드립니다.

끝으로 항상 저를 바른길로 인도하시고, 믿어주셨던 제 인생의 등불이신 어머니와 누나, 매형께 사랑과 감사의 마음을 전합니다.